

A Intensificação Agropecuária e suas Implicações nas Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Rio Grande do Sul: Uma análise espacial com Dados Secundários para o Ano de 2023

Agricultural Intensification and its Implications on Greenhouse Gas (GHG) Emissions in Rio Grande do Sul: A Spatial Analysis with Secondary Data for the Year 2023

Autor(es): Rodrigo Otávio Mendonça da Silva, Jose Heraldo Figueiredo dos Santos

Filiação: UFPEL, UFPEL

E-mail: rodrigo.gestorambiental1@gmail.com , jose.heraldo18@gmail.com.

Grupo de Trabalho (GT): <<GT4. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade>>

Resumo

Este artigo investiga as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Rio Grande do Sul, com foco nas interações entre a intensificação das áreas plantadas e as emissões de GEE, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente o ODS 13 (Ação Climática). A pesquisa utiliza dados secundários para o ano de 2023, analisando as principais fontes de emissões no estado, como área plantada, responsáveis pela emissão de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) e utiliza o método de análise espacial e os Índices de Moran's Univariado e Bivariado. Como principais resultados, as análises demonstram que a distribuição espacial das emissões de GEE e área plantadas estão bem definidas no Estado do RS e que pode ter uma autocorrelação espacial moderada entre as emissões de GEE e área plantada, fato este que é mais perceptível na parte sul/oeste do Estado do RS.

Palavras-chave: emissão de carbono, área plantada, agricultura.

Abstract

This article investigates greenhouse gas (GHG) emissions in Rio Grande do Sul, focusing on the interactions between the intensification of planted areas and GHG emissions, in line with the Sustainable Development goals (SDGs), particularly SDG 13 (Climate Action). The research uses secondary data for the year 2023, analyzing the main sources of emissions in the state, such as planted area, responsible for the emission of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) and uses the spatial analysis method and the Univariate and Bivariate Moran's Indices. As main results, the analyses demonstrate that the spatial distribution of GHG emissions and planted area are well defined in the State of RS and that there may be a moderate spatial autocorrelation between GHG emissions and planted area, a fact that is more noticeable in the south/west part of the State of RS.

Key words: carbon emissions, planted area, agriculture.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas deixaram de ser uma preocupação apenas ambiental para se tornarem uma questão central de desenvolvimento, com implicações diretas na segurança alimentar, na gestão de recursos naturais e na estabilidade econômica global. O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, em particular dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (N₂O), tem provocado distúrbios nos ciclos hidrológicos, ampliado a frequência de eventos extremos e impactado a produtividade agrícola em diversas regiões do planeta (IPCC, 2023). Nesse cenário, compreender as origens e padrões

das emissões se tornou uma demanda estratégica para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas sustentáveis.

O setor agropecuário representa uma das maiores fontes de emissão de GEE no Brasil, sendo responsável por aproximadamente 38% das emissões totais em 2023 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024). Esse índice, acima da média global para o setor (22%), revela a necessidade urgente de integrar a agropecuária às estratégias de mitigação e adaptação climática. A fermentação entérica, o uso de fertilizantes nitrogenados e a conversão de áreas naturais em sistemas produtivos são as principais causas dessas emissões, exigindo soluções que combinem eficiência produtiva com menor impacto ambiental (MARTINS et al., 2022). Essa necessidade está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas. Em particular, os ODS 2, 12, 13 e 15 tratam, respectivamente, da fome zero e agricultura sustentável, do consumo e produção responsáveis, da ação contra a mudança climática e da vida terrestre.

O Rio Grande do Sul, está localizado no extremo sul do Brasil, o estado é composto por 497 municípios, com uma área total de 281.707,15 km², incluindo as áreas da Laguna dos Patos e da Lagoa Mirim. Em 2022, o estado tinha uma população de 10.882.965 habitantes, correspondendo a 5,4% da população brasileira, sendo o sexto estado mais populoso do país. No mesmo ano, o estado contribuiu com 6% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, alcançando o quinto lugar entre as unidades da federação, com um PIB per capita de cerca de R\$ 51 mil/ano (DEE/SPGG, 2024) está inserido nessa lógica produtiva, apresenta uma dinâmica territorial marcada por fortes contrastes entre áreas de alta densidade urbana, polos industriais consolidados e extensas regiões dedicadas à agropecuária. A produção agrícola e pecuária é particularmente significativa em regiões como a Campanha Gaúcha, a Depressão Central e a Fronteira Oeste, enquanto áreas como a Serra Gaúcha concentram florestas nativas e plantadas, funcionando como potenciais sumidouros de carbono (Silva Junior et al., 2023). A espacialização das emissões no território estadual revela, portanto, padrões diferenciados de intensidade e distribuição, demandando uma abordagem metodológica capaz de captar essas variações com precisão e rigor técnico.

O ODS 13 convoca os países a adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e seus impactos. Esse compromisso implica o monitoramento das emissões, a transição para sistemas produtivos resilientes e a adoção de tecnologias de baixo carbono, especialmente nos setores mais emissores. No contexto brasileiro, e mais especificamente no estado do Rio Grande do Sul, isso envolve repensar práticas agroindustriais que, embora economicamente relevantes, estão cada vez mais expostas à instabilidade climática. O ODS 15, que trata da proteção dos ecossistemas terrestres e da restauração de áreas degradadas, também é crucial, especialmente quando se observa o avanço da degradação das pastagens nativas no Bioma Pampa e a baixa regeneração da vegetação natural (BRASIL, 2025).

Desta forma, compreender como as emissões de GEE se distribuem espacial e temporalmente em território estadual é essencial para identificar áreas críticas, monitorar tendências e subsidiar estratégias territoriais de mitigação. A utilização de ferramentas de análise espacial permite não apenas mapear os focos de maior intensidade de emissões, mas também entender os vínculos entre fatores socioeconômicos, uso da terra e padrões climáticos. Este estudo propõe analisar o padrão espacial das emissões de GEE e das áreas plantadas no estado do Rio Grande do Sul no ano de 2023, através de análises espaciais e do LISA univariado e bivariado. Além desta seção introdutória o presente artigo está composto pelas seguintes seções: Referencial teórico, metodologia, dados e análise exploratória, resultados e discussões, conclusão e referências

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A plataforma SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa) é um instrumento essencial para medir e monitorar as emissões de GEE no Brasil. Criada para ajudar o país a cumprir seus compromissos climáticos, o SEEG fornece uma estimativa precisa e detalhada das emissões de cada setor econômico, incluindo a agricultura e a pecuária, permitindo uma análise mais eficaz das contribuições de cada área para as mudanças climáticas (AZEVEDO et al., 2018). Através de dados de inventários nacionais, sensoriamento remoto e informações de uso da terra, o SEEG é capaz de quantificar as emissões e identificar os setores com maior potencial de mitigação.

A importância da plataforma SEEG vai além da quantificação das emissões. Ela oferece uma visão detalhada da distribuição geográfica das emissões em nível subnacional, permitindo que se identifiquem hotspots de emissão em diferentes regiões do Brasil. No contexto do Rio Grande do Sul, por exemplo, a agropecuária intensiva, em particular o cultivo de soja, a pecuária de corte e a produção de leite, são responsáveis por uma parcela significativa das emissões de GEE do estado (SEEG, 2024). Essa distribuição espacial de emissões é fundamental para a implementação de políticas públicas locais e regionais, voltadas para a mitigação das mudanças climáticas.

É importante ressaltar que, embora o Brasil tenha se comprometido a reduzir suas emissões de GEE em 43% até 2030, em comparação com os níveis de 2005 (NDCs, 2021), as emissões de GEE ainda representam um desafio significativo, especialmente no setor agropecuário. O setor precisa adotar novas práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias de baixo carbono para alcançar os objetivos estabelecidos no Acordo de Paris (KIM et al., 2020). O modelo de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e o uso de fertilizantes de precisão são exemplos de práticas que podem reduzir as emissões de metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (N_2O), ao mesmo tempo que aumentam a produtividade das atividades agropecuárias sem expandir as áreas de cultivo ou pastagem (SOUZA et al., 2021).

O Modelo de Kuznets Ambiental (EKC) e a Agropecuária Brasileira, sugere que, à medida que um país atinge um maior nível de desenvolvimento econômico, as emissões de GEE aumentam inicialmente, mas, em estágios posteriores, a tecnologia limpa e a regulação ambiental levam à redução das emissões. Esse modelo pode ser observado nas regiões mais desenvolvidas do Brasil, onde a adoção de tecnologias sustentáveis e políticas de controle de emissões têm mostrado reduções nas emissões de GEE, enquanto as áreas menos desenvolvidas ainda enfrentam altos níveis de emissões devido a práticas não sustentáveis na agricultura e pecuária (KIM et al., 2020).

Esse conceito é frequentemente utilizado para analisar as dinâmicas de emissões de GEE no contexto de países em desenvolvimento, como o Brasil, especialmente no setor da agropecuária, que é um dos principais emissores de gases de efeito estufa devido à expansão da fronteira agrícola e ao uso extensivo da terra (Câmara et al., 2022). A agricultura intensiva, particularmente no caso da produção de soja e pecuária, tem gerado altos índices de emissão, mas ao mesmo tempo, com o aumento da tecnologia e inovação, o país apresenta possibilidades de reduzir essas emissões.

O setor agropecuário brasileiro tem sido uma das maiores fontes de emissões de GEE, com a pecuária responsável por uma parte significativa das emissões de metano (CH_4), devido à fermentação entérica dos ruminantes. Além disso, a agricultura extensiva, com a conversão de florestas em áreas de cultivo, contribui para a liberação de CO_2 armazenado no solo (Seabra,

2017). Esse cenário representa um desafio para o cumprimento das metas climáticas do Brasil, particularmente as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) sob o Acordo de Paris.

Entretanto, o Modelo de Kuznets Ambiental oferece uma explicação teórica para a possibilidade de redução das emissões à medida que o país evolui em termos econômicos e tecnológicos. O Brasil, embora tenha expandido suas fronteiras agrícolas e intensificado a pecuária nas últimas décadas, também tem adotado tecnologias mais sustentáveis, como o uso de fertilizantes de precisão e a implementação de práticas como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que busca combinar atividades agrícolas, pecuárias e florestais de forma que o setor agropecuário reduza suas emissões e aumente a capacidade de sequestro de carbono (Santos et al., 2019).

A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta é um exemplo de como o Brasil pode aplicar o EKC, adotando tecnologias mais limpas e implementando políticas que reduzam as emissões sem prejudicar a produtividade agropecuária. Com isso, espera-se que o Brasil atinja um ponto de inflexão, onde a emissão de GEE no setor agropecuário comece a diminuir, mesmo com o aumento da produção.

Conforme o Brasil atinge um nível de desenvolvimento econômico mais avançado, observa-se um movimento em direção à adoção de tecnologias mais limpas, que possibilitam a redução das emissões. Por exemplo, novas práticas de manejo de pastagem, o uso de fertilizantes controlados, e a agricultura de precisão têm sido cada vez mais aplicadas para reduzir o impacto ambiental da agricultura e pecuária (Santos et al., 2019). Esse processo de transição também está relacionado a um aumento no investimento em pesquisa e inovação, com foco na eficiência produtiva e no uso sustentável dos recursos naturais. A implementação de políticas públicas mais rígidas, incluindo regulamentações sobre uso do solo e emissões de GEE, é uma característica observada em países que estão se aproximando do ponto de inflexão sugerido pelo EKC (Costantini & Monni, 2008).

A política ambiental brasileira tem buscado alinhar o crescimento do setor agropecuário com a necessidade de reduzir as emissões de GEE. O Brasil, como um dos maiores emissores de gases de efeito estufa no mundo, comprometeu-se a reduzir suas emissões em 43% até 2030, em comparação com os níveis de 2005, conforme estipulado pelas NDCs no Acordo de Paris (NDCs, 2021). A aplicação do Modelo de Kuznets Ambiental sugere que, à medida que o Brasil adota tecnologias limpas e investe em práticas agrícolas sustentáveis, como o ILPF e o uso de máquinas agrícolas de precisão, as emissões de GEE no setor agropecuário tendem a se estabilizar e até a reduzir.

O uso da tecnologia agrícola e a integração de sistemas agroflorestais têm mostrado ser caminhos eficazes para aumentar a produtividade sem expandir a área de cultivo. Além disso, políticas públicas que incentivem a restauração de ecossistemas e a proteção de áreas de carbono, como as Reservas Legais e as Áreas de Preservação Permanente (APPs), têm sido fundamentais para garantir que a intensificação da produção agropecuária não leve a um aumento das emissões (Nogueira et al., 2020).

Apesar das oportunidades proporcionadas pelas tecnologias de baixo carbono, o Brasil ainda enfrenta desafios significativos. A expansão da fronteira agrícola e as práticas de uso extensivo da terra são questões cruciais que precisam ser tratadas para que o Brasil consiga reduzir as emissões em conformidade com seus compromissos climáticos. O desmatamento ilegal e a queima de biomassa continuam a ser problemas persistentes, especialmente na Amazônia e no Cerrado, onde as atividades agropecuárias são menos reguladas e mais dependentes de práticas não sustentáveis.

No entanto, o modelo EKC oferece uma perspectiva otimista, sugerindo que, à medida que o Brasil adota novas tecnologias e políticas ambientais, é possível alcançar uma redução das emissões de GEE, mesmo com o crescimento da produção agropecuária. O desenvolvimento sustentável da agricultura brasileira pode ser alcançado se houver investimentos em pesquisa e uma regulação eficaz que promova práticas de manejo sustentável (Macedo et al., 2021). A próxima seção será apresentados a metodologia.

3. METODOLOGIA

No intuito de compreender os padrões espaciais nas mudanças no uso e cobertura da terra (LULCC) e as nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil/Rio Grande do Sul, o presente estudo utiliza a Análise Explanatória de Dados Espaciais (AEDE) como ferramenta para alcançar tal objetivo. Segundo Almeida (2012), a AEDE permite identificar se os dados estão autocorrelacionados espacialmente, além da presença de possíveis outliers.

Uma das formas de identificação de autocorrelação espacial dos dados é a utilização da estatística I de Moran global. O valor gerado pela estatística está sempre entre 1 e -1, onde valores positivos indicam autocorrelação positiva e vice-versa. Além disso, conforme Kopczewska (2020), enquanto mais próximo de 1 for o valor encontrado, maior é a autocorrelação positiva, indicando a existência de clusters de valores similares (altos e baixos). Por outro lado, quanto mais o valor encontrado se aproximar de -1, é um indicativo de alta autocorrelação negativa, que está relacionada com uma maior presença de ilhas de valores dispersos. A formulação da estatística I de Moran está representada pela equação (1):

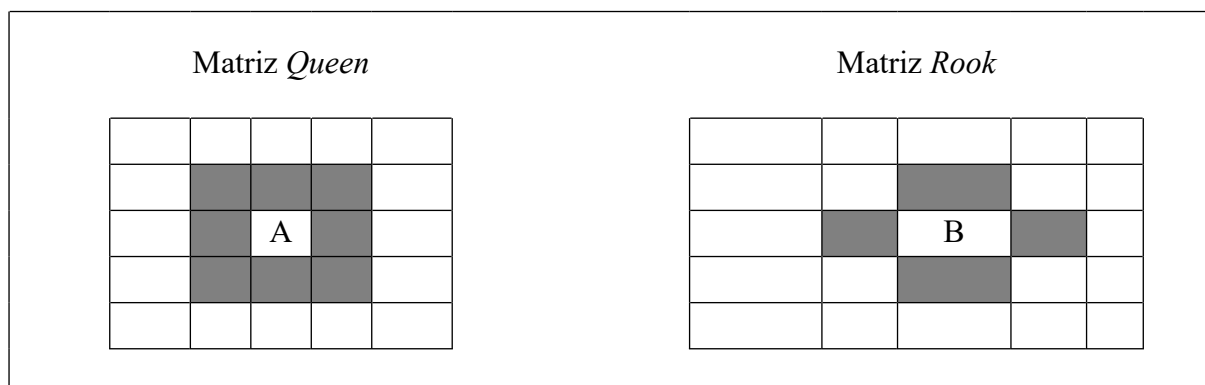
$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (1)$$

Onde, para o caso deste trabalho, n refere-se ao número de municípios de São Paulo, e Z_i e Z_j o número de roubos por cem mil habitantes em 2024 para os municípios i e j respectivamente; w_{ij} refere-se aos elementos da matriz de pesos espaciais utilizada; S_0 representa a somatória de todos os elementos da matriz de pesos espaciais.

Dessa forma, para realizarmos o cálculo da estatística de I de Moran, é necessária a seleção de uma matriz de pesos espaciais. Assim, buscando evitar a arbitrariedade desta escolha, o presente estudo propõe-se a calcular o I de Moran para algumas das matrizes de contiguidade mais difundidas na literatura, como é o caso das matrizes *Queen*, *Rook* e de K-vizinhos mais próximos. Assim, conforme sugerido por Almeida (2012), é selecionada a matriz W que captura a maior autocorrelação espacial.

Nesse sentido, de acordo com Almeida (2012), a matriz de contiguidade Queen é aquela que considera não somente as fronteiras diferentes de zero, mas também os vértices como contíguos. Já a matriz Rook considera somente as fronteiras com extensão diferente de zero. Uma maneira visual de exemplificar o exposto está presente na Figura 1. Já a matriz de K-vizinhos mais próximos, por sua vez, pode ser calculada através da distância geográfica. Uma das formas mais usuais é a implementação de pontos centrais nas regiões de interesse, que podem ser determinados através de métricas como a distância euclidiana.

Figura 1. Exemplificação visual das matrizes de contiguidade Queen e Rook.



Fonte: Elaboração própria, adaptado de Almeida (2012).

Posteriormente aos testes utilizados, o presente estudo se propõe a realizar a análise do I de Moran Local, que se trata de uma estatística do tipo *Local Indicator of Spatial Association* (LISA). O I de Moran Local é utilizado para medir se determinada região de interesse é rodeada por regiões com valores diferentes ou similares à variável de interesse em relação à distribuição aleatória destes valores no espaço (Kopczewska, 2020). Assim, o indicador global é decomposto de forma local em cada observação, gerando quatro categorias: Alto-Alto (AA), Baixo-Baixo (BB), Alto-Baixo (AB) e Baixo-Alto (BA), onde cada uma destas categorias corresponde a um quadrante do diagrama de dispersão de Moran (Almeida, 2012). As categorias em questão são descritas por De Farias, Leivas e Menezes (2018) conforme a Tabela 1.

Quadro 1. Padrões de Associação Linear

Padrão de Associação Linear	Quadrante	Descrição
Alto-Alto (AA)	1º	Regiões com valores altos de uma variável, cercadas por regiões com valores também altos para a mesma variável.
Baixo-Alto (BA)	2º	Regiões com valores baixos de determinada variável, rodeadas por regiões que possuem valores acima da média para a mesma variável.
Baixo-Baixo (BB)	3º	Regiões que possuem baixo valor para uma variável, e que estão cercadas por regiões que apresentam valores também baixos para a mesma variável.
Alto-Baixo (AB)	4º	Regiões que possuem alto valor de uma variável de interesse, e que estão rodeadas por regiões que apresentam valores baixos para a mesma variável.

Fonte: De Farias, Leivas e Menezes (2018).

A análise do I de Moran, quando se inclui outra variável, no caso deste trabalho, se tem relação entre as emissões de GEE e a área plantada (hectares), parte desta análise passa pelo índice de Moran Global Bivariado. Em se tratando deste índice o conceito de correção espacial é complexo e por vezes mal interpretado Normalmente calcula-se o índice considerando a

correlação entre X e uma média de Y avaliada entre os vizinhos. A fórmula generalizada do Moran bivariado global é dada por:

$$I^B = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i^* y_j^*}{\sum_{i=1}^n (x_i^*)^2}, \quad (2)$$

Em que $x_i^* = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}$ e $y_i^* = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y}$.

E para que se calcule o índice Moran Local Bivariado (LISA Bivariado), onde este índice captura a relação no local i , a média dos vizinhos para outra variável, sua equação é dada por:

$$I_i^B = x_i^* \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j^*, \quad (3)$$

Em que $x_i^* = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}$ e $y_i^* = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y}$.

Nas próximas seções serão apresentados a base de dados e os resultados.

4. DADOS E ANÁLISE EXPLANATÓRIA

Os dados de emissão do efeito estufa para o Rio Grande do Sul são da Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) com recorte para o ano de 2023. Já os dados de área plantada para o Estado do Rio Grande do Sul, são da Produção Agrícola Municipal (PAM) também para o ano de 2023.

Segundo o quadro 2, quando se analisa as estatísticas descritivas das emissões de gases do Efeito Estufa (GEE) e a área plantada, infere-se que, ambas as variáveis estão assimétricas, ou seja, com valores máximos bem maiores do que suas medianas, o que fortemente indica a presença de outliers, ou que poucos municípios tem produzindo muito gás do efeito estufa ou que sua área plantada seja superior e muito acima da média.

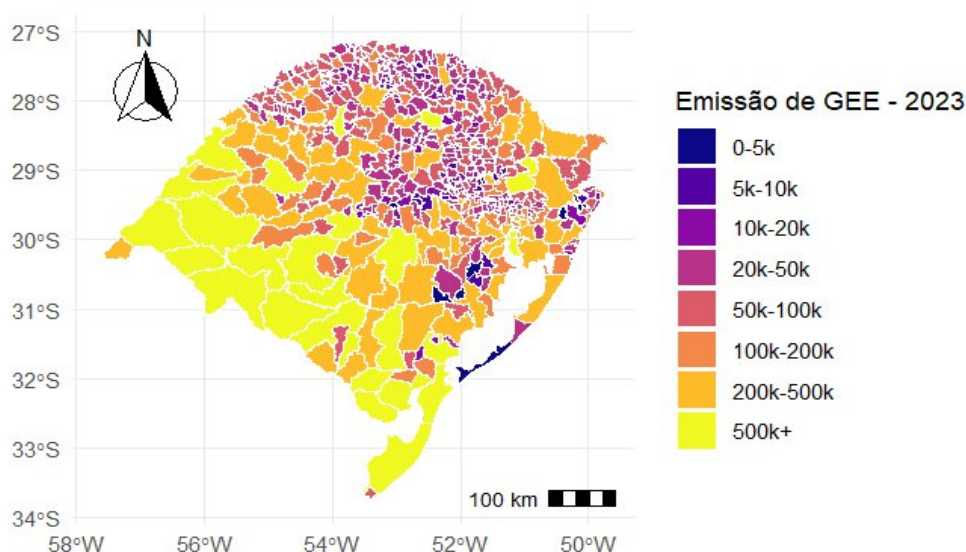
Quando 2: Descrição das variáveis Emissão e área plantada - 2023

Estatística	Emissão - 2023	Área Plantada - 2023
N	497	497
Média	145.461 mil tCO_2e	58.52 hectares
Desvio padrão	342.319 mil tCO_2e	32.01 hectares
Mínimo (min)	942.0 mil tCO_2e	0.00 hectares
25% (Q1)	27.935 mil tCO_2e	27.00 hectares
Mediana (Q2)	53.111 mil tCO_2e	68.00 hectares
75% (Q3)	127.182 mil tCO_2e	87.00 hectares
Máximo (max)	6.057.877 tCO_2e	100.00 hectares

Fonte: Elaboração própria através dos dados da SEEG e PAM (2025).

No caso das emissões de GEE, o valor máximo tende a 5 milhões de tCO_2e , ou seja, quase 100 vezes maior que a mediana, o que indica que possa existir um ou alguns municípios que sejam altamente emissores de gases do efeito Estufa. Já em relação a área plantada, o ponto máximo não é tão discrepante quanto a sua mediana, porém, esta indicação ainda mostra que exista uma concentração de área plantada por parte dos municípios.

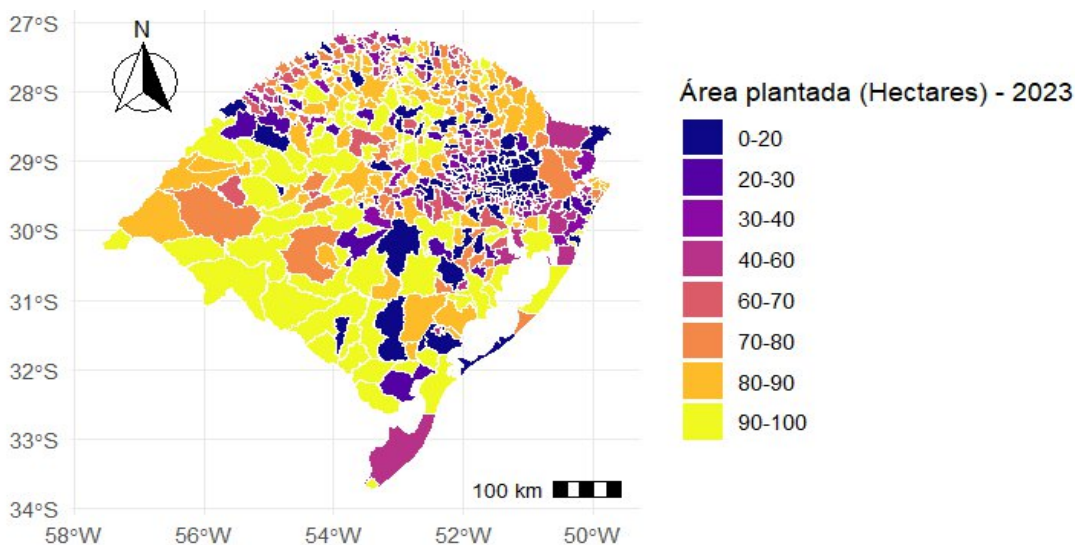
Mapa 1: Distribuição espacial das emissões de Gases do Efeito Estufa – ano 2023.



Fonte: Elaboração própria através de dados da SEEG (2025).

O que pode justificar essas números discrepantes para as variáveis emissão de gases de GEE e área plantada? Quando se põem essas variáveis no mapa do Rio Grande do Sul, se tem uma ideia da concentração de emissão de gases e de área plantada. O mapa 1, apresenta uma distribuição das emissões de GEE principalmente no lado sul/oeste do Estado e na região metropolitana de Porto Alegre

Mapa 2: Distribuição espacial das áreas plantadas (Hectares) – Ano 2023.



Fonte: Elaboração própria através de dados da PAM. (2025).

O mapa 2, indica uma forte concentração de emissão de gases do GEE, justamente naquelas regiões onde historicamente são as maiores produtoras de arroz e soja, no Estado do Rio grande do sul, o mapa 2, indica o total de área plantada no Estado do Rio Grande do sul, o que se constata e que pode existir uma correlação espacial, já que para plantar determinadas culturas sejam elas temporárias ou permanentes, exige-se uma utilização de maquinários, fertilizantes, queimas... Etc.

Quadro 3: Comparação espacial entre os Mapas 1 e 2.

Região	Emissão de GEE. Alta?	Área plantada. Alta?	Interpretação
Sul/Sudeste	Sim	Sim	Alta correlação entre agricultura e emissões de GEE
Centro/Oeste	Média-Alta	Alta	Área produtiva relevante, mas emissão proporcional
Norte/Nordeste	Baixa	Baixa	Pouca atividade agrícola, pouca emissão
Extremo Leste (Litoral)	Alta emissão	Baixa área plantada	Provável efeito de outras atividades (pecuária, indústria?)

Fonte: Elaboração própria através de dados da SEEG e da PAM (2025).

Em relação ao quadro 3, pode-se inferir que ambos os mapas podem ter uma relação entre si, quando se faz as mesmas perguntas para ambas os mapas. Quais as regiões que mais são fortes em emissão de gases do GEE e em área plantada? Regiões Sul/sudeste, o que indica uma alta correlação entre área plantada e emissão de gases. Outra região que tem área produtiva e emissão proporcional. As regiões Norte/nordeste quem pouca atividade agrícola. Na próxima seção, está localizadas os testes do I de Moran e o Moran Bivariado para demonstrar se existe autorrelação espacial entre emissão de GEE e área plantada no Rio Grande do Sul.

5. RESULTADOS E DISCURSÕES

Neste seção serão discutidos os resultados sobre autocorrelação espacial univariadas no caso das emissões de GEE e área plantada do Estado do RS. Neste ponto, precisa-se decidir qual a melhor matriz de peso espacial que deverá ser usada na avaliação do I de Moran univariado e o Moran Bivariado. Segundo os resultados obtidos das matrizes de peso espacial presentes no quadro 3, a melhor matriz de peso espacial para as emissões de GEE é a Queen de ordem 1, mesmo resultado para a escolha de matriz de área plantada. Sendo ambas Queen de ordem 1. Além disso, os resultados do I de Moran confirmam que ambas as variáveis mantêm uma relação espacial moderada tanto em emissão de GEE e em área plantada.

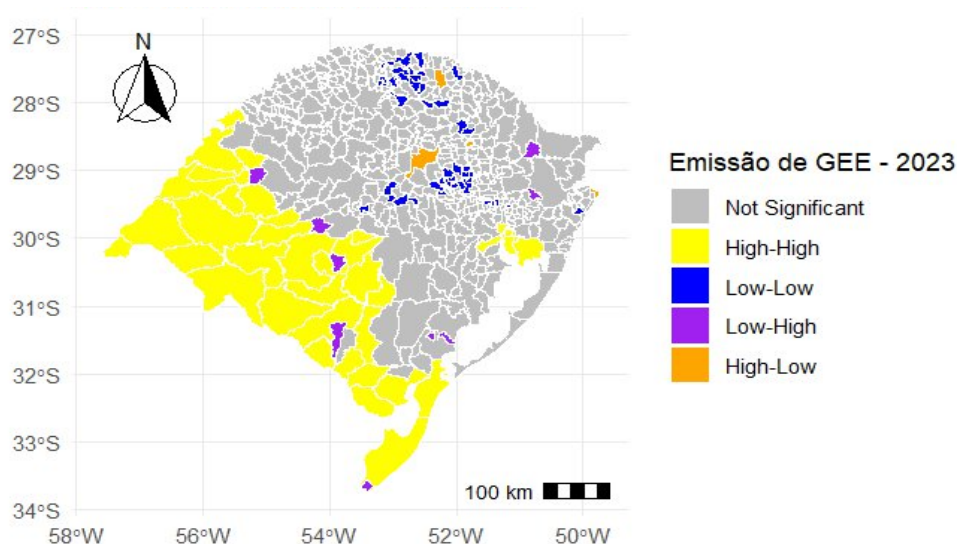
Quadro 3: Escolha da melhor matriz de peso espacial

Variável	Matriz de peso	Moran's I	P-Valor	Variável	Matriz de peso	Moran's I	P-Valor
EMISSION DE GEE	Queen 1	0.295	0.000	AREA PLANTADA	Queen 1	0.289	0.000
	Queen 2	0.207	0.000		Queen 2	0.227	0.000
	Queen 3	0.123	0.000		Queen 3	0.178	0.000
	Rook 1	0.294	0.000		Rook 1	0.289	0.001
	Rook 2	0.206	0.001		Rook 2	0.229	0.000
	Rook 3	0.123	0.000		Rook 3	0.177	0.000
	K-vizinhos 4	0.270	0.000		K-vizinhos 4	0.288	0.000
	K-vizinhos 5	0.269	0.000		K-vizinhos 5	0.267	0.000
	K-vizinhos 6	0.271	0.000		K-vizinhos 6	0.271	0.000

Fonte: Elaboração própria através de dados da SEEG e da PAM (2025).

A partir dos resultados do LISA univariável das emissões de gases do efeito estufa, pode-se inferir que sua formação de cluster tem 3 pontos extremamente bem destacados, como o High-High (amarelo), este por sua vez está em duas regiões específicas do Estado do RS. A primeira coincide de forma parcial com a área plantada, na parte sul/oeste do Estado do RS e a segunda específica na região metropolitana de Porto Alegre, região conhecida por sua produção industrial.

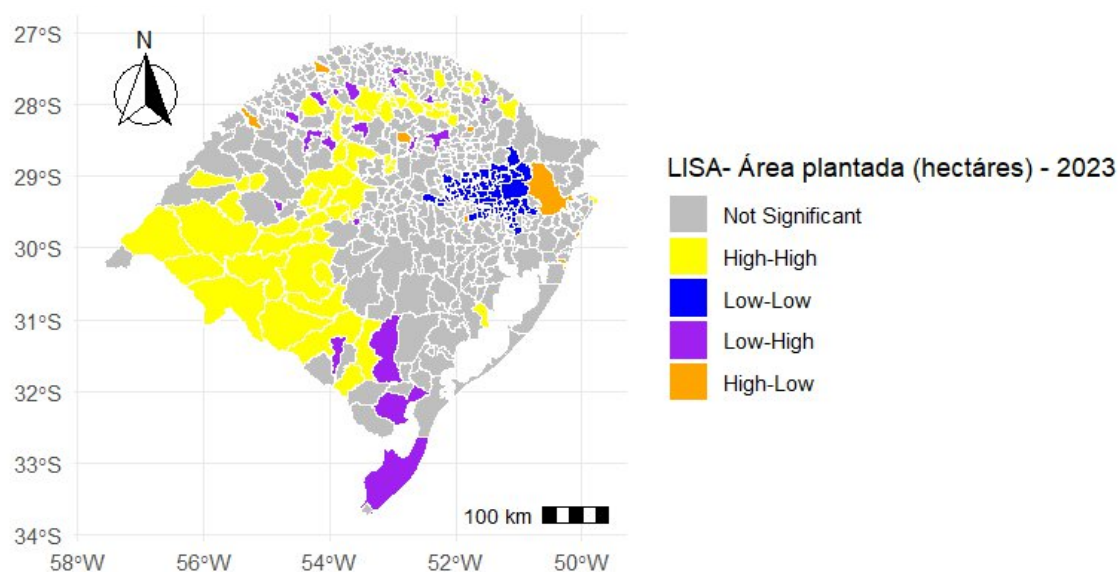
Mapa 3: LISA – Emissão de Gases.



Fonte: Elaboração própria através dos dados da SEEG (2025).

Ainda sobre o mapa 3, os pontos de baixa emissão de gases do efeito estufa, ou seja, os pontos de Low-Low (azul), High-Low (laranja), estão localizados na região conhecida como serra gaúcha e no norte de Estado do RS. Mostrando um padrão bem definido de emissão de gases.

Mapa 4: LISA – Área plantada.



Fonte: Elaboração própria através de dados da PAM (2025).

Em relação ao Mapa 4: área plantada, este por sua vez, mostra uma formação de alguns cluster diferentes do mapa 3, porém, com especificações parecidas, como na formação do cluster High-High (amarelo), nas áreas que ficam na região conhecida como o Pampa gaúcho. Em relação a formação de cluster Low-Low (azul), este por sua vez está inserido na região da serra gaúcha, ou seja, em terras que tem pouca produtividade e espaços para plantar. Em comparação ao norte do Estado do RS, o que se pode inferir é uma formação de pequenos cluster de High-High.

Portanto, quando se busca uma comparação espacial entre ambos os LISAs univariados, a síntese do quadro 4, demonstra que para a região Sul e sudeste, existe uma coincidência espacial parcial, ou seja, demonstra que nem toda plantação alta gera uma alta emissão de GEE. Em relação a região norte/nordeste, onde existe a presença em ambos os LISAs univariados de formação de clusters Low-Low, estas por sua vez, confirmam uma baixa atividade agropecuária e uma baixa emissão de GEE.

Quadro 4: Comparação entre os LISAs Univariados - 2023

Padrão	Área plantada	Emissão de GEE	Interpretação
High-High	Sudeste, noroeste	Sul, Sudoeste	Há coincidência parcial, mas nem toda plantação alta gera alta emissão
Low-Low	Nordeste	Nordeste norte	Confirmam baixa atividade agropecuária e baixa emissão
Outliers	Poucos High-Low e Low-High	Mias Low-High no centro-norte	Emissão pode estar vindo de outras fontes além da agricultura
Zonas não significativas	Grande parte do centro-leste	Centro e norte	Nessas áreas, a variabilidade local é alta ou os dados são mais dispersos.

Fonte: Elaboração própria através dos resultados do LISA Univariado (2025).

Em relação a região centro-leste e parte da região centro-norte do Estado do RS, demonstra algumas desconexões (outliers), ou seja, poucos High-Low e Low-High em relação a área plantada e mais Low-High no centro-norte quando se fala em emissão de GEE, o que neste caso indica que as emissões de GEE podem estar sendo geradas de outras fontes que não seja a agricultura. Já em relação as zonas não significativas, focando principalmente no centro do Estado do RS, estas existe uma grande presença de variabilidade local e tendem a ter dados mais dispersos.

Resumindo, o Lisa Univariado de área plantada e de emissão de GEE revelam clusters espaciais claros e que possa existir coincidência parcial entre as áreas plantadas e a emissão de GEE, o que reforça a hipótese de que há uma relação positiva entre esses dois tipos de dados, mesmo que exista possa existir outras variáveis que podem influenciar. Por fim a presença de outliers espaciais High-Low e Low-High sugerem diferenças de práticas agrícolas, a existência de uso de diferentes tecnologia, pecuária (que não foi levada em consideração neste artigo) e/ou fatores ambientais mais específicos.

LISA BIVARIADO

Inferese sobre o quadro 5, dos resultados do LISA bivariado das variáveis Emissão de GEE e Área plantada do ano de 2013 que revelou padrões espaciais de dependência entre essas variáveis. O I de Moran global bivariado revelou uma estatística de 0,123, o que indicia uma autocorrelação moderada entre a emissão de gases de GEE e área plantada.

Quadro 5: LISA BIVARIADO – Emissão de GEE x Área Plantada - 2023.

Estatística	Valor
Índice Original	0.123
viés	-0,123
Erro Padrão	0.019

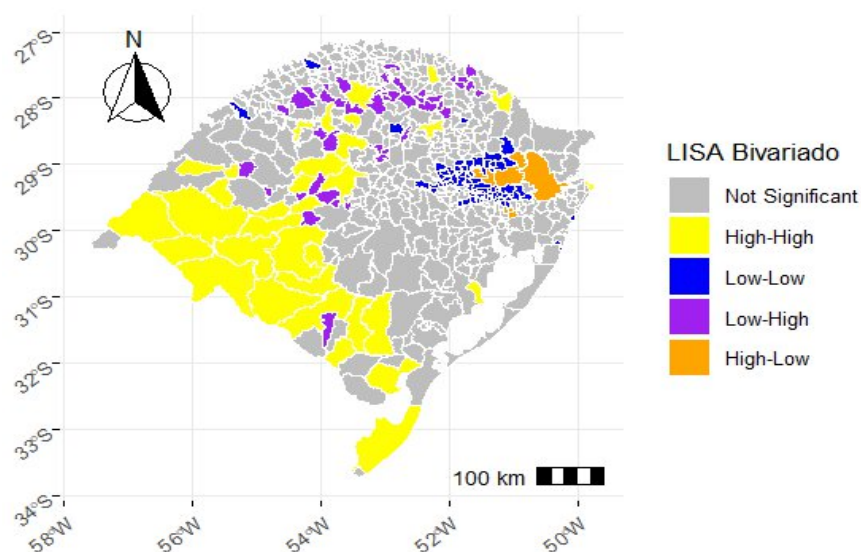
Fonte: Elaboração própria através dos dados da SEEG e da PAM (2025).

Apesar da autocorrelação moderada, o viés observado indica que as permutações dos dados, demonstrou uma redução da robustez das estatísticas, o que resulta que se de tonar necessária um análise mais detalhada das áreas específicas de clusterização. Analisando o mapa 5 do I de Moran Bivariado, este por sua vez indica regiões de High-High (amarelo), esses cluster indicam uma forte emissão de GEE e área plantada, e estas áreas estão cercadas por áreas de resultados iguais, o que indica a existência de um polo de polos produtivos que tem altas emissões de GEE.

Em relação as outras formações de cluster as regiões Low-High (roxo), são áreas cercadas por locais de alta emissão de GEE, porem com produções baixas, p que pode indicar existência de outras atividades que influenciam na emissão de GEE. Regiões Low-Low (azul), indicam quanto de área plantadas tem menos atividade, indicando assim, áreas de menor atividade agrícolas e menores emissões de GEE.

Por fim, a região High-Low, esta por sua vez indica grandes áreas plantadas, porem, com pouca emissão de GEE, o que sugere que possa existir práticas sustentáveis ou setores produtivos que são menos poluentes. Já as áreas não significativas (cinza), estas áreas são áreas com poucas correlação espacial ou correlação espacial não significativa entre as variáveis.

Mapa 5: Lisa Bivariado – Emissão de GEE x Área Plantada (2023).



Fonte: Elaboração própria através de dados da SEEG e PAM (2025).

O LISA Bivariado indicou que o padrão espacial possa ter correlação espacial entre as áreas plantadas e as emissões de GEE. Algumas áreas apresentaram aurocorrelação positiva entre as variáveis área plantada e emissão de GEE. Porém outras áreas estão destoando do padrão desejado para que haja uma forte correlação entre essas variáveis. O que indica que o fato de indicar essas correlações pode ajudar para que sejam feitas políticas públicas voltadas a redução das emissões de gases e consequentemente a mitigação dos impactos ambientais, especificamente em áreas com cluster High-High.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo procurou analisar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto da intensificação das áreas plantadas no Rio Grande do Sul, destacando o papel fundamental da agricultura como setores emissores de GEE e as oportunidades para mitigação das emissões. O uso de dados secundários para o ano de 2023 permitiu uma análise detalhada e atualizada das dinâmicas de emissão no estado, oferecendo subsídios valiosos para a formulação de políticas públicas de mitigação. A análise revelou que a agropecuária intensiva, principalmente nas áreas de soja e arroz, continua sendo uma das principais fontes de emissões de GEE, como apontado por Seabra (2017), que destaca a conversão de florestas em áreas agrícolas como uma das maiores responsáveis pela liberação de CO₂.

MARTINS et al. (2022) destacam que o Brasil, embora um grande emissor de GEE, tem adotado estratégias de mitigação, como o uso de fertilizantes controlados e práticas como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que ajudam a reduzir as emissões sem comprometer a produtividade. Esse modelo de agricultura sustentável pode ser uma das chaves para o Rio Grande do Sul, região que apresenta um grande potencial para a adoção dessas práticas, considerando sua forte base agropecuária.

Além disso, os dados do Sistema de Estimativa de Emissões de GEE (SEEG) confirmaram que a agricultura no estado é uma das principais responsáveis pelas emissões de óxidos de nitrogênio (N₂O), originados do uso de fertilizantes nitrogenados, como observado por Santos et al. (2019). A utilização de fertilizantes de precisão e a implementação de tecnologias de manejo eficiente do solo são estratégias essenciais para mitigar esses impactos, como evidenciado pela redução das emissões de N₂O observada em áreas com agricultura de precisão.

O Brasil, por meio do Acordo de Paris, comprometeu-se a reduzir suas emissões em 43% até 2030, conforme os Compromissos Nacionais (NDCs), e o cumprimento dessa meta depende diretamente da evolução das práticas agropecuárias, especialmente na pecuária de corte e no cultivo de soja.

Em relação ao setor agropecuário do Rio Grande do Sul, os resultados demonstraram que, embora a intensificação agropecuária tenha sido responsável por uma elevação das emissões de GEE, há uma tendência de transição para práticas mais sustentáveis, como o uso de mecanismos de sequestro de carbono nas pastagens e a restauração de ecossistemas naturais. Isso se alinha com a visão de COSTANTINI & MONNI (2008), que enfatizam que o

desenvolvimento sustentável no setor agrícola é possível quando os investimentos em pesquisa e tecnologia são direcionados para a redução de impactos ambientais.

Contudo, é importante destacar que, apesar das oportunidades apresentadas pela adoção de tecnologias de baixo carbono e práticas como a ILPF, o estudo também revelou que o desmatamento ilegal e a expansão descontrolada das fronteiras agrícolas continuam sendo grandes desafios para a redução das emissões no Brasil. Seabra (2017) e Câmara et al. (2022) destacam que a agricultura extensiva e as práticas de pastagem tradicional são responsáveis por grandes quantidades de emissões de CO₂, especialmente na Amazônia e no Cerrado, onde o uso inadequado da terra ainda predomina. Assim, a criação de políticas públicas que regulamentem o uso da terra e incentivem a proteção de áreas florestais será crucial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas no Brasil.

Em síntese, o estudo demonstra que há autocorrelação moderada entre emissões de gases do efeito estufa e área plantada especialmente CO₂, CH₄ e N₂O. No entanto se faz necessário a adoção de outros estudos que especificam melhor essa relação de emissão de gases e outras atividades do ramo agropecuário. Para alcançar uma agricultura sustentável, será fundamental investir em políticas públicas eficazes que integrem inovações tecnológicas, regulação ambiental e educação para garantir um futuro mais equilibrado entre produção agropecuária e preservação ambiental.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Eduardo. Econometria espacial. Campinas–SP. Alínea, v. 31, 2012.

BRASIL. Relatório Anual de Desmatamento no Brasil - SAD 2025. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2025.

CÂMARA, G. et al. O impacto da agricultura intensiva no ambiente: o caso da agropecuária no Brasil. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 17, n. 4, p. 34-49, 2022.

COSTANTINI, V.; MONNI, S. Environmental Kuznets Curve and Economic Growth: A Study of the Brazilian Agricultural Sector. *Ecological Economics*, v. 32, n. 2, p. 145-159, 2008.

DE FARIAS, Hellen Nunes; LEIVAS, Pedro Henrique; MENEZES, Gabrielito. Análise espacial da pobreza nos municípios gaúchos. *Revista Estudo & Debate*, v. 25, n. 2, 2018.

DEE; SPGG – DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA; SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO. Perfil socioeconômico do Rio Grande do Sul 2024. Porto Alegre: Governo do Estado do RS, 2024.

FIERGS – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Boletim técnico: perspectivas da agroindústria gaúcha. Porto Alegre: FIERGS, 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 30 mar. 2025.

KIM, S. et al. Environmental Kuznets Curve and Climate Change Mitigation: Evidence from the Brazilian Agropecuaries. *Environmental Economics and Policy Studies*, v. 22, n. 4, p. 487-504, 2020.

KOPCZEWSKA, K. Applied spatial statistics and econometrics: data analysis in R. Cham: Springer Nature, 2020.

MACEDO, M. et al. Agriculture and Carbon Emissions: The Role of Agroforestry Systems in Reducing GHG Emissions in Brazil. *Sustainable Agriculture Reviews*, v. 50, p. 56-70, 2021.

MARTINS, A. R. et al. Políticas de mitigação de carbono na agropecuária: desafios e oportunidades. *Revista de Políticas Públicas e Desenvolvimento Sustentável*, Brasília, v. 8, n. 2, p. 33-52, 2022.

MARTINS, A. R. et al. A mitigação de carbono na agropecuária brasileira: desafios e oportunidades. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 45, n. 2, p. 12-23, 2022.

NDCs. Contribuições Nacionalmente Determinadas do Brasil no Acordo de Paris. Ministério do Meio Ambiente, 2021. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 25 mar. 2025

NOGUEIRA, R. et al. Technological Innovations and Their Impact on GHG Emissions in Brazilian Agriculture. *Agricultural Systems Journal*, v. 31, n. 5, p. 450-466, 2020.

NOGUEIRA, R. et al. Políticas públicas e práticas agrícolas sustentáveis: um estudo sobre o uso de fertilizantes e a redução das emissões no Brasil. *Agricultural Systems Journal*, v. 31, n. 5, p. 450-466, 2020.

SANTOS, J. P. et al. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e suas contribuições para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 16, n. 1, p. 112-125, 2019.

SEABRA, M. L. O impacto da mudança no uso da terra nas emissões de CO₂ no Brasil. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 34, n. 1, p. 120-135, 2017

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) – Observatorio do Clima (OC), 2024/c12.0.